

УДК 621.039.743

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);**А. Г. Трифонов**, доктор технических наук, профессор (БГТУ);**Т. Ю. Пронкевич**, младший научный сотрудник (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси)

**МНОГОМЕРНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В БАССЕЙНАХ ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАВШЕГО
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА АЭС**

Приведена модель для оценки процессов тепломассопереноса в бассейнах выдержки отработавшего ядерного топлива АЭС с реактором типа ВВЭР-1200 при различных степенях заполнения. Для расчета процессов переноса в стеллажах бассейна выдержки принята модель пористого тела, которая позволила провести модельное описание сложных конструкций. Показано, что чрезмерная плотная упаковка «свежих» тепловыделяющих сборок (ТВС) для принятой конструкции бассейна выдержки может привести к значительному повышению температуры отработавшего ядерного топлива. Согласно результатам численного моделирования, степень заполнения стеллажей с ТВС не должна превышать 20% для свежевыгруженного топлива АЭС.

A model for estimation of heat and mass transfer processes in the basins of the extracts of spent nuclear fuel from NPP reactor VVER-1200 with varying degrees of filling is presented. For the calculation of transport processes in the racks of basins of the extracts the porous body model is proposed, which allowed to carry out a model description of complex constructions. It is shown that excessive tight pack of “fresh” spent nuclear fuel can lead to a significant rise in temperature of the one. According to the results of numerical simulation of the filling levels of spent nuclear fuel not exceed 20% for “fresh” fuel.

Введение. Необходимым условием строительства и эксплуатации ядерного объекта является система хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Многолетний опыт «мокрого» хранения ОЯТ в бассейнах выдержки (БВ) доказал его надежность и удобство, особенно для уменьшения уровня радиационных нагрузок и тепловыделения отработавшего топлива непосредственно после выгрузки из реактора [1–3].

Развитие систем БВ сопровождается двумя тенденциями: с одной стороны, введением различных устройств и конструкций, направленных на повышение уровня безопасности процесса хранения; с другой – тенденцией к снижению затрат на хранение ОЯТ, что сводится преимущественно к максимально плотной упаковке ОТВС в стеллажах БВ (рис. 1).

Проект АЭС с ВВЭР-1200 предусматривает уплотненное хранение ОТВС, что вызвано целями экономики при необходимости хранения ОЯТ в бассейне не менее 10 лет. Общая емкость стеллажей БВ для ТВС и герметичных пеналов составляет 756 ячеек. При таком способе хранения теплоотвод затрудняется малым пространством для циркуляции воды между шестигранными трубами стеллажей хранения.

Чрезмерная высокая температура воды в отсеках БВ может привести к кипению с последующей деструкцией топливного элемента или к снижению плотности окружающей ТВС среды с возможностью возникновения самопроизвольной ядерной реакции.



Рис. 1. Конструкция из скрепленных стеллажей для размещения ОТВС в бассейне выдержки на АЭС с ВВЭР-1200

При возникновении кризиса теплообмена начинается разогрев поверхности оболочки тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) до высоких температур, при которых происходит химическая реакция окисления циркония при взаимодействии с водой. При этом освобождается водород, образующий взрывоопасную «гремучую смесь» с кислородом. Интенсивность данной реакции при невысоких температурах 0–350°C чрезвычайно мала. При температурах больше 400°C интенсивность этой реакции возрастает и начинается заметное окисление циркония, что ухудшает термомеханические свойства материала оболочки.

Помимо химических взаимодействий повышение температуры оболочки само по себе при-

водит к изменению термомеханических свойств. При температуре выше 350°C прочностные свойства оболочки несколько ухудшаются, а пластические увеличиваются. Наиболее резко свойства оболочки изменяются в интервале температур от 400 до 500°C.

Постановка задачи исследования. Как видно из описанных выше особенностей поведения циркония при изменении температуры, существуют три уровня температурных показаний состояния оболочки.

Первый уровень – 350°C – означает некоторое ухудшение прочностных свойств.

Второй уровень – 450°C – означает резкое ухудшение прочностных свойств и заметное окисление циркония при взаимодействии с водой.

Третий уровень – 1000–1200°C – означает цепную химическую пароциркониевую реакцию. Этот уровень температур означает быстрое разрушение оболочки и вывод из строя одного из основных барьеров ядерной безопасности в реакторах ВВЭР.

Таким образом, возникает проблема обеспечения безопасности хранения ОЯТ посредством выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров системы охлаждения в условиях плотной упаковки ОТВС в стеллажах БВ.

При плановой перегрузке топлива для отвода тепла от ОТВС в приреакторном БВ имеется система охлаждения, которая периодически включается, поддерживая температуру воды в бассейне до 30°C. Максимальная температура воды в БВ не должна превышать 70°C при полной выгрузке ОТВС в бассейн выдержки из активной зоны реактора [2].

Таким образом, охлаждение ОТВС происходит двумя путями:

1) за счет вынужденной конвекции вентилируемого воздуха над поверхностью воды в верхней части БВ;

2) за счет принудительной циркуляции охлаждающей воды.

Метод анализа. Основой методик анализа БВ и ТВС могут служить их численные модельные аналоги 3D.

Подобные модельные аналоги должны быть построены применительно к сложным пространственным геометрическим структурам и описывать различные режимы теплоотвода с учетом как конвективного переноса, так и эффекта испарения.

В основу таких методик должны быть положены 2D и 3D нестационарные уравнения сохранения при начальных и граничных условиях, соответствующих реальным условиям хранения ОЯТ в БВ.

В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан модельный аналог сис-

темы временного хранения и охлаждения ОЯТ в приреакторном БВ (рис. 2).

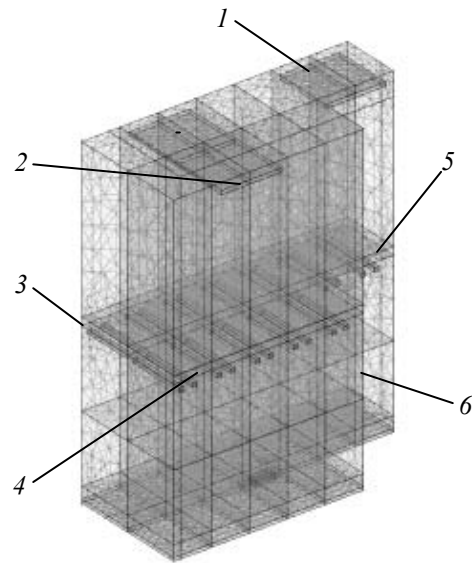


Рис. 2. Модельный аналог и расчетная сетка БВ (геометрические параметры – 6×13×17 м):

- 1 – входной воздушный вентиляционный канал;
- 2 – выходной воздушный вентиляционный канал;
- 3 – патрубок подвода охлаждающей воды в отсек;
- 4 – патрубок отвода воды из отсека;
- 5 – уровень воды в отсеке;
- 6 – место расположения ОТВС в отсеке

При построении расчетной модели БВ приняты следующие основные допущения:

- 1) движение газовой фазы описывается в рамках двухкомпонентной паровоздушной смеси;
- 2) физические свойства воды и твердых сред принимаются постоянными, а свойства паровоздушной смеси – зависящими от температуры, давления и относительной влажности воздуха;
- 3) дно и стенки бассейна выдержки считаются теплоизолированными, и вынос теплоты осуществляется, соответственно, только через вентиляционные каналы.

При этом учитывались два механизма теплосъема: за счет конвекции в верхней части БВ и принудительного впрыска и забора воды через дренажный коллектор и штатный забор вблизи верхнего уровня жидкости. Радиационный теплообмен не рассматривался.

Общая модель описания процессов переноса строилась на основе решения нестационарных уравнений сохранения количества движения, массы и тепловой энергии в виде [4]

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \left[\eta \left(\nabla U + (\nabla U)^T \right) \right] + \rho U \nabla U + \nabla P = 0,$$

$$\nabla U = 0,$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla (\lambda \nabla T) + \varepsilon Q_V,$$

где ρ – плотность среды; U – скорость потока; η – коэффициент динамической вязкости; P – гидростатическое давление; T – температура; C_p – удельная теплоемкость; \vec{u} – вектор скорости; λ – коэффициент теплопроводности; Q_v – объемный тепловой источник. Верхний индекс T – турбулентная составляющая, определяемая согласно модели турбулентности k – ϵ в интерпретации COMSOL Multiphysics.

Для описания процессов переноса в отсеках БВ (рис. 3) с различной степенью конструктивного заполнения $(1-\epsilon)$ было принято уравнение Бринкмана в следующем виде

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{1}{(1-\epsilon)} \nabla \left[\eta (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + \frac{\eta}{k} U + \nabla P = 0,$$

где $(1-\epsilon)$ – степень конструкционного заполнения отсека БВ при средней доле проходного сечения ϵ ; k – коэффициент проницаемости, в расчетах было принято $k = 0,01$.

Введение понятия пористости позволило единым методом учитывать процессы переноса в сложной конструкции стеллажа ОТВ в широком диапазоне степени конструкционного заполнения $(1-\epsilon)$. Стеллажи и отсеки для хранения ОТВС можно рассматривать как гетерогенные среды с множеством неоднородностей в виде меняющихся проходных сечений. Очевидно, что рассмотрение каждой отдельной неоднородности не представляется возможным. Выход из этого затруднения состоит в том, чтобы моделировать реальный гетерогенный отсек с различным уровнем заполнения ОТВС $(1-\epsilon)$, заменяя его эффективной гомогенной средой, обладающей теми же макроскопическими свойствами и поведением при внешнем воздействии, что и реальный объект.

В рассматриваемом в данной работе методе макроскопические транспортные свойства и поведение материала отсека БВ для хранения ОТВС выводятся, исходя из его структурного заполнения объема. Возможность выделения представительного пористого объема крайне существенна для организации вычислительных экспериментов при различных степенях заполнения БВ.

Дополнительно решалось уравнение сохранения массы паровой фазы:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla c = \nabla (D \nabla c),$$

где c – концентрация пара, D – коэффициент диффузии пара в воздухе.

Суммарный тепловой поток через поверхность раздела фаз принимался равным

$$q_{sum} = q_{ev} + q_{con},$$

где q_{ev} – тепловой поток вследствие испарения; q_{con} – тепловой поток в результате конвекции.

Суммарный тепловой поток в приближении метода приведенной пленки вблизи поверхности БВ определялся как [6]

$$q_{sum} = \frac{Nu}{L} \left[\lambda_{mix} (T_{sf} - T_{\infty}) + D'' \rho_{mix} k \ln \left(\frac{(m_{mix} (1-c''))_{\infty}}{(m_{mix} (1-c''))_{sf}} \right) \right],$$

где Nu – число Нуссельта; L – характерный линейный масштаб процессов у поверхности; λ_{mix} – коэффициент теплопроводности паровоздушной смеси; T_{sf} – температура насыщения (у поверхности); T_{∞} – температура на удалении от поверхности; D'' – коэффициент диффузии пара в воздухе; ρ_{mix} – плотность паровоздушной смеси; k – скрытая теплота парообразования; m_{mix} – масса паровоздушной смеси.

Для численной реализации модельного аналога БВ использовался метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics. При этом решалась задача на установление нестационарного процесса.

Результаты вычислительного эксперимента. Численное моделирование тепломассообменных процессов при хранении ОЯТ в бассейне выдержки было реализовано для трех случаев:

- минимальная пористость (максимальное заполнение) – 20% при сливе через нижний дренажный коллектор;
- минимальная пористость – 20% при отборе воды через патрубок в верхней части отсека;
- варианты расчеты при различных значениях пористости (в процентах) и при отборе воды через патрубок в верхней части отсека с целью контроля, чтобы максимальная температура ОТВС не достигла точки кипения.

Проведенные вычислительные эксперименты позволили качественно и количественно оценить тепломассообменные процессы в системе хранения ОТВС.

Результаты модельных экспериментов представлены на рис. 3–5.

Эффективность развития массовых потоков в жидкости и парогазовой зоне в зависимости от организации циркуляционного охлаждения ТВС с нижним и верхним подводом охлаждающей воды проиллюстрирована на рис. 3. Как видно, в БВ можно выделить две зоны конвективных потоков. В верхней части присутствует зона с вынужденным газовым потоком. Принудительная циркуляция воздушного потока предназначена для удаления паров воды и частичного конвективного теплосъема.

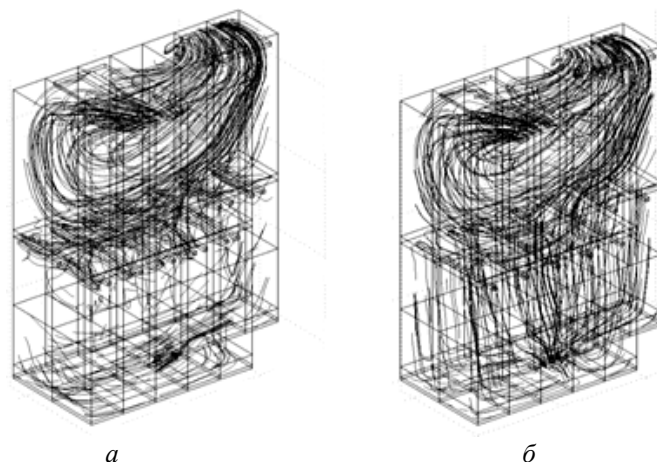


Рис. 3. Пространственное распределение векторов и функций тока в слое жидкости и газовой области БВ (геометрические параметры согласно рис. 2):
 а – при заборе воды только через верхний патрубок;
 б – при заборе воды только через нижнее дренажное отверстие

Основной теплосъем от ОТВС проводится в слой жидкости с последующим теплоотводом или через нижний дренажный коллектор, или через заборные патрубки. При этом первый вариант (рис. 3, а) является запасным по требованиям системы безопасности. Однако такой вариант теплосъема наиболее эффективен и достаточен, так как имеется принудительная циркуляция воды через стеллажи с ОТВС. Во втором варианте (рис. 3, б) последующий теплоотвод идет через отборные патрубки и внешний воздушный поток. Данный вариант является более теплонапряженным для ОТВС, так как теплосъем от ОТВС проводится через естественную конвекцию в стесненной области.

Как следует из расчета тепловых процессов в БВ можно выделить 3 характерные температурные зоны (рис. 4):

- верхняя холодная зона с циркуляцией воздушного потока;
- средняя (промежуточная) зона;
- нижняя горячая зона, в которой расположены ОТВС с остаточным тепловыделением.

Промежуточный слой воды служит зоной смешанного теплообмена между внешним холодным воздухом и горячими ОТВС. Кроме того, в этом слое происходит подмешивание воды из системы внешнего охлаждения.

Как показали модельные вычислительные эксперименты, верхний отвод воды из БВ не всегда является достаточным вариантом охлаждения ОТВС (рис. 5).

Так, в случае полного заполнения отсека БВ (проходное сечение только 20% и исходное остаточное тепловыделение 1 кВт/м^3) свободного пространства явно недостаточно для достижения безопасной температуры ОТВС (рис. 5, б).

В этом случае отмечается аномально высокая температура, вплоть до 780 К. Аномально высокая температура в отсеке с ОТВС может быть снижена до допустимых значений при организации штатного теплосъема через дренажный коллектор (рис. 5, а).

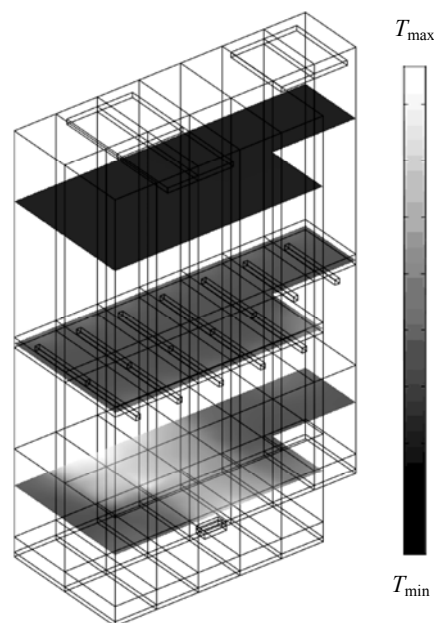


Рис. 4. Характерные температурные зоны БВ (диапазон температур 288–328 К)

При организации штатной системы охлаждения через водозаборные патрубки допустимая температура ОТВС может быть достигнута только при заполнении отсека стеллажами с ОТВС не выше 20% (рис. 5, в). Получаемое в данном случае свободное сечение 80% является достаточным для формирования теплосъема от естественной конвекции.

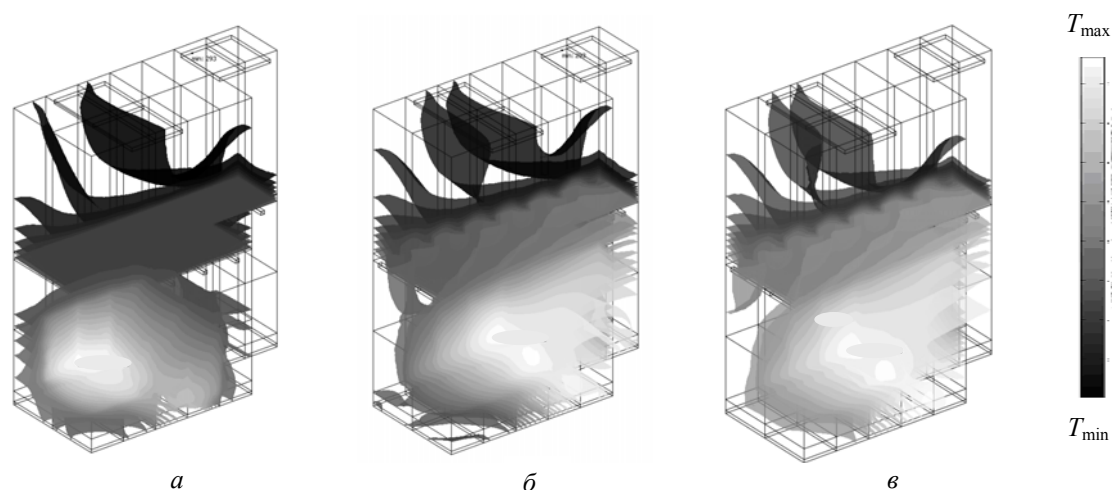


Рис. 5. Пространственное распределение поля температур в БВ (геометрические параметры согласно рис. 2):

- а* – минимальная пористость (максимальное заполнение) 20% при сливе через нижний дренажный коллектор; максимальная температура ОТВС; диапазон температур 288–328 К;
б – минимальная пористость 20% при отборе воды через патрубок в верхней части отсека; максимальная температура ОТВС является аномально высокой; диапазон температур 288–806 К;
в – варианты расчеты при различных значениях пористости (в процентах) и при отборе воды через патрубок в верхней части отсека с целью контроля, чтобы максимальная температура ОТВС не достигла точки кипения; диапазон температур 288–369 К

Заключение. В рамках среды разработки вычислительных программ COMSOL создан компьютерный модуль расчета процессов тепломассопереноса в бассейне выдержки отработавшего топлива с учетом неравномерного заполнения и неравномерного тепловыделения в ТВС.

Для расчета гидродинамических характеристик в отсеках с тепловыделяющими сборками предложена модель пористого тела. Получены расчетные значения полей скоростей и температур в бассейне выдержки.

Проведены варианты расчеты по сравнительной оценке различных условий охлаждения и максимальной температуре ОТВС. Определено, что принудительная прокачка воды через стеллажи существенно снижает максимальную температуру ОТВС даже при его максимальном заполнении. В тоже время забор и ввод воды через верхнюю часть отсека с ОТВС приводит к тому, что теплосъем с ОТВС происходит только вследствие естественной конвекции в стесненной конструкции стеллажа.

В результате вариантных расчетов была определена максимальная степень заполнения $((1 - \epsilon) = 20\%)$ отсека стеллажей ОТВС в БВ, которая не приводит к росту температуры выше точки кипения при варианте с наихудшей организацией теплосъема.

Разработанный вычислительный шаблон и результаты данного исследования могут быть использованы для проведения экспертизы безопасности хранения ОЯТ в приреакторных бассейнах выдержки, и в частности белорусской АЭС.

Литература

1. Технологический процесс перевода ОЯТ РБМК-1000 с «мокрого» на «сухое» хранение / В. И. Калинин [и др.]. – СПб.: ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», 2010. – 107 с.
2. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов / В. И. Калинин [и др.]. – СПб.: ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», 2009. – 107 с.
3. Federovich, E. D. Technical issues of wet and dry storage facilities for spent nuclear fuel / E. D. Federovich, I. I. Poluzunov // Safety related issues of spent nuclear fuel storage. – Springer, 2007. – P. 189–208.
4. Андрижиевский, А. А. Оценка условий теплообмена в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива с учетом эффекта испарения / А. А. Андрижиевский, А. Г. Трифонов, Т. Ю. Пронкевич // Труды БГТУ. – 2012. – № 3: Химия и технология неорганич. в-в. – С. 145–149.

Поступила 22.02.2013